

好気性微生物の代謝産物によるセメントペーストの劣化

広島大学 正会員 田澤榮一 広島大学 森永 力
 広島大学 正会員 河合研至 ○広島大学 学生員 河野克哉

1. はじめに

本研究は、コンクリートの化学的劣化の中でも、微生物が関与して引き起こされる「コンクリートの微生物腐食」に着目している。このような劣化は、下水道関連施設などのコンクリート構造物において多く報告されており、嫌気性条件下での硫酸塩還元細菌和好気性条件下での硫黄酸化細菌の代謝活動により硫酸が生成され、この硫酸によるコンクリートの腐食劣化と言える¹⁾。昨年度までの研究では、下水道とは異なるある地下埋設コンクリート構造物の劣化調査を行い、その劣化を生じているコンクリート構造物周辺の土壌から分離、培養した微生物の中でコンクリートの劣化に関与していると思われる微生物（硫化水素生成細菌、硫黄酸化細菌）を用いて好気性条件下でモルタルの劣化試験を行ってきた。その結果、嫌気性条件を経ること無く、好気性条件のみでコンクリートの劣化が生じることが明かになった。本年度は、これまでの、いわば特殊な微生物に限らず、自然界に広く生息しているような一般的な微生物にまで研究対象を広げ、このような微生物として細菌、糸状菌（カビ）から代表的菌株を選び出し、これらの微生物の好気性条件下における代謝産物がセメントペーストに与える影響を検討した。

2. 実験方法

本実験で使用した菌株は、細菌2株（*Bacillus subtilis*、*Escherichia coli*）ならびに糸状菌2株（*Penicillium expansum*、*Aureobasidium pullulans*）である。これらの微生物を、細菌の場合は普通液体培地（肉エキス10g、ペプトン10g、グルコース10g、蒸留水1ℓ）、糸状菌の場合はポテトデキストロース培地（じゃがいも抽出液1ℓ、デキストロース10g）に接種して坂口フラスコにて恒温室で培養し、増殖曲線を作成した。この増殖曲線から対数増殖期を定め、培養器内に、この時期の菌体を接種した液体培地を入れ、その中にセメントペースト供試体を浸漬して恒温室（細菌は37℃、糸状菌は28℃）で32日間培養することでセメントペースト劣化試験を行った。なお、ブランクは、供試体を浸漬させ菌を接種しないもの（ブランクA）と、供試体を浸漬せず菌を接種するもの（ブランクB）の2通りを用意した。そして、経時的に、培養液は菌体量、pH、陽イオン濃度、無機陰イオン濃度、有機酸濃度を測定し、供試体は表層部の示差熱・熱重量分析、粉末X線回折試験を行った。なお、供試体はW/C=40%のセメントペーストとし、4×4×16cmの型枠に打設し、材令1日で脱型後28日まで水中養生（20℃）した後、4×4×4cmに整形したものをを用いた。ただし、*Bacillus subtilis*の場合の供試体は、W/C=30%のセメントペーストとした。

3. 実験結果及び考察

培養液中の陽イオンの分析は、 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} について行った。 Ca^{2+} 濃度の変化をFig.1に示す。ただし、イオン濃度の算出に当たってはブランクA（菌は接種せず、供試体を浸漬した培養器）の値を差し引いている。 Ca^{2+} 濃度は、いずれの菌株を用いた場合でも培養日数の経過とともに増加する傾向があった。ブランクB（菌を接種し、供試体は浸漬していない培養器）の値と比較して、かなり高い値を示すことから微生物の代謝産物によりセメントペーストから Ca^{2+} が溶出したことが分かる。また、いずれの菌株の場合も Ca^{2+} 濃度は、上昇後に一度低下する傾向を示すが、これは微生物の呼吸作用により排出された二酸化炭素（炭酸イオン）と反応し炭酸カルシウムとして沈澱したためと考えられる。 K^{+} 、 Na^{+} 濃度は一般に大きな変化はなかったが、*Aureobasidium pullulans*の場合に多少増加する傾向がみられ、これらのアルカリイオンはセメントペースト中からの溶出と思われる。一方、培養液中の無機陰イオンの分析は、 SO_4^{2-} について行ったが、いずれの菌株の場合も極めて微量な変化であった。

培養液中の有機酸濃度の変化をFig.2に示す。ただし、有機酸濃度の算出に当たってはブランクA（菌は接

種せず、供試体を浸漬した培養器)の値を差し引いている。また、ここでは極めて生成量の多かった有機酸のみを示している。いずれの菌株の場合にも、かなり高濃度で有機酸が代謝産物として生成されているが、有機酸は微生物の種類により異なった物質になることが分かった。

示差熱・熱重量分析結果よりセメントペースト供試体表層部の水酸化カルシウム、炭酸カルシウム及び全カルシウムの定量を行った。その結果、微生物を接種していない培養液に浸漬したセメントペーストに比べて、接種した培養液中のセメントペーストでは水酸化カルシウムが減少しており、炭酸カルシウムの生成量が多くなっていることが分かった。これは、微生物の代謝産物である有機酸等によりセメントペースト中の水酸化カルシウムが培養液中に溶出すること、また、細菌の呼吸作用によって排出された二酸化炭素(炭酸イオン)によりセメントペーストが炭酸化を受けたためと考えられる。また、いずれの菌株においても32日目までに全カルシウム量が増加しており、ブランクA(菌は接種せず、供試体を浸漬した培養器)の値と比較しても高い値となっている。これは、微生物の呼吸作用によって排出された二酸化炭素(炭酸イオン)によりカルシウム・シリケート水和物(C-S-H)やエトリンガイトなどの複塩が分解したためであると考えられる²⁾。

また、セメントペースト供試体表層部の粉末X線回折の結果、いずれの菌株の場合にも、菌接種後32日間培養した培養液中のセメントペースト供試体の炭酸カルシウムのピークは、水酸化カルシウムのピークよりも高くなっていたり、あるいは0日目やブランクA(菌は接種せず、供試体を浸漬した培養器)の供試体の炭酸カルシウムのピークよりも高くなる傾向があった。さらに細菌(*Bacillus subtilis*、*Escherichia coli*)を接種し、32日間培養した供試体からは、エトリンガイトが確認された。

4. 結論

本実験で用いた菌株を接種した培養液中のセメントペースト供試体からは、カルシウムが激しく溶出して劣化していることが分かった。培養液中には、微生物の代謝産物としての有機酸、ならびに呼吸作用により排出される二酸化炭素(炭酸イオン)が存在しており、カルシウム塩の溶解度は一般に有機酸塩は高く、無機塩は低いことを考えると、セメントペースト中の水酸化カルシウムと炭酸イオンの反応により生じた炭酸カルシウムはセメントペースト内に沈積しやすく、セメントペースト中からのカルシウムイオンの溶出には有機酸が大きく寄与していることが推察される。また、セメントペースト中のカルシウム化合物は、反応速度に差があるものの、いずれも炭酸イオンにより分解されることが知られている。従って、微生物の代謝産物である有機酸によるセメントペースト中のカルシウムイオンの溶出ならびに呼吸作用によって排出された二酸化炭素(炭酸イオン)によるセメントペースト中のカルシウム化合物の分解が繰り返される形で、劣化が進行したものと考えられる。

【参考文献】 1)中本:下水道施設におけるコンクリート構造物の化学的劣化,土木学会論文集, No. 472/V-20, pp. 1~11, 1993. 8 2)河合・寺西・森永・田澤:好気性細菌によって引き起こされるコンクリートの劣化,土木学会論文集 No. 478/V-21, pp. 125~131, 1993. 11

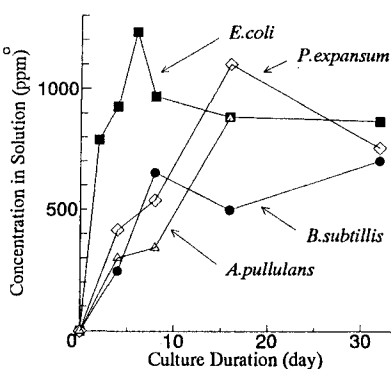


Fig.1 培養液中のカルシウムイオン濃度の変化

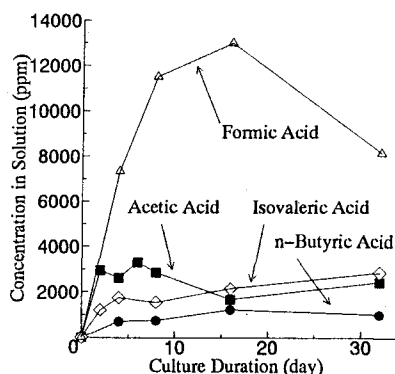


Fig.2 培養液中の有機酸濃度の変化

●: *B. subtilis* ■: *E. coli*
◇: *P. expansum* △: *A. pullulans*